

Serge Brouyère
Groundwater Resources Engineering

*A quoi bon protéger l'eau
souterraine alors qu'on peut
acheter de l'eau en bouteille ?*

Une petite anecdote pour commencer ...



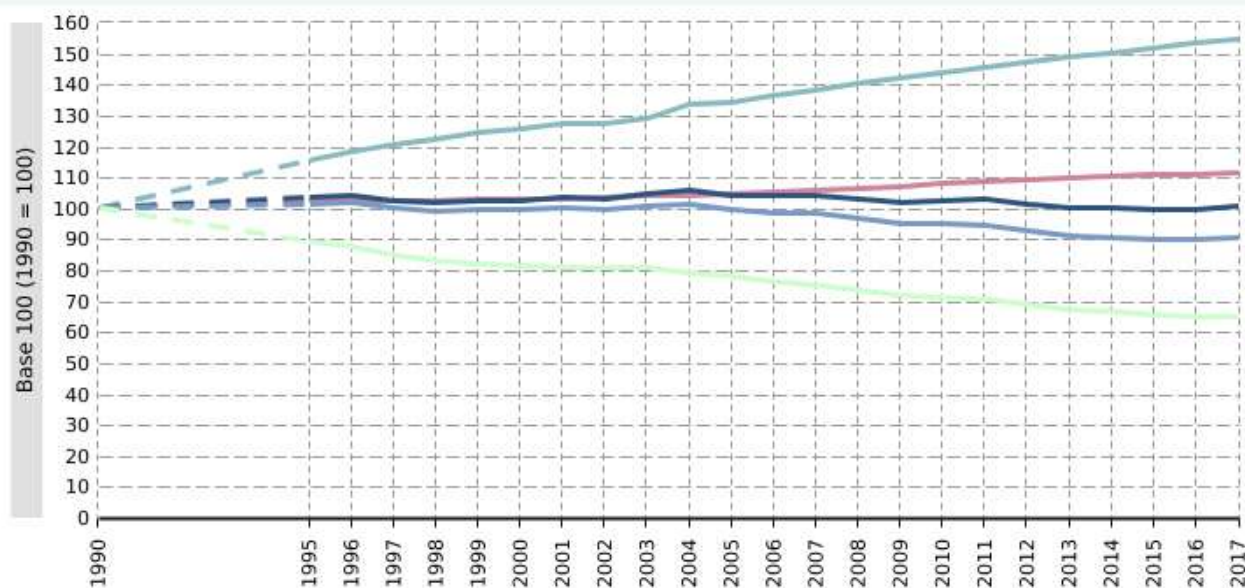
A quoi bon protéger
l'eau souterraine alors qu'on peut
acheter de l'eau en bouteille ?



Quelle est la consommation annuelle d'eau de distribution par habitant en Wallonie?



Consommation d'eau de distribution (à usages domestique et non domestique) en Wallonie



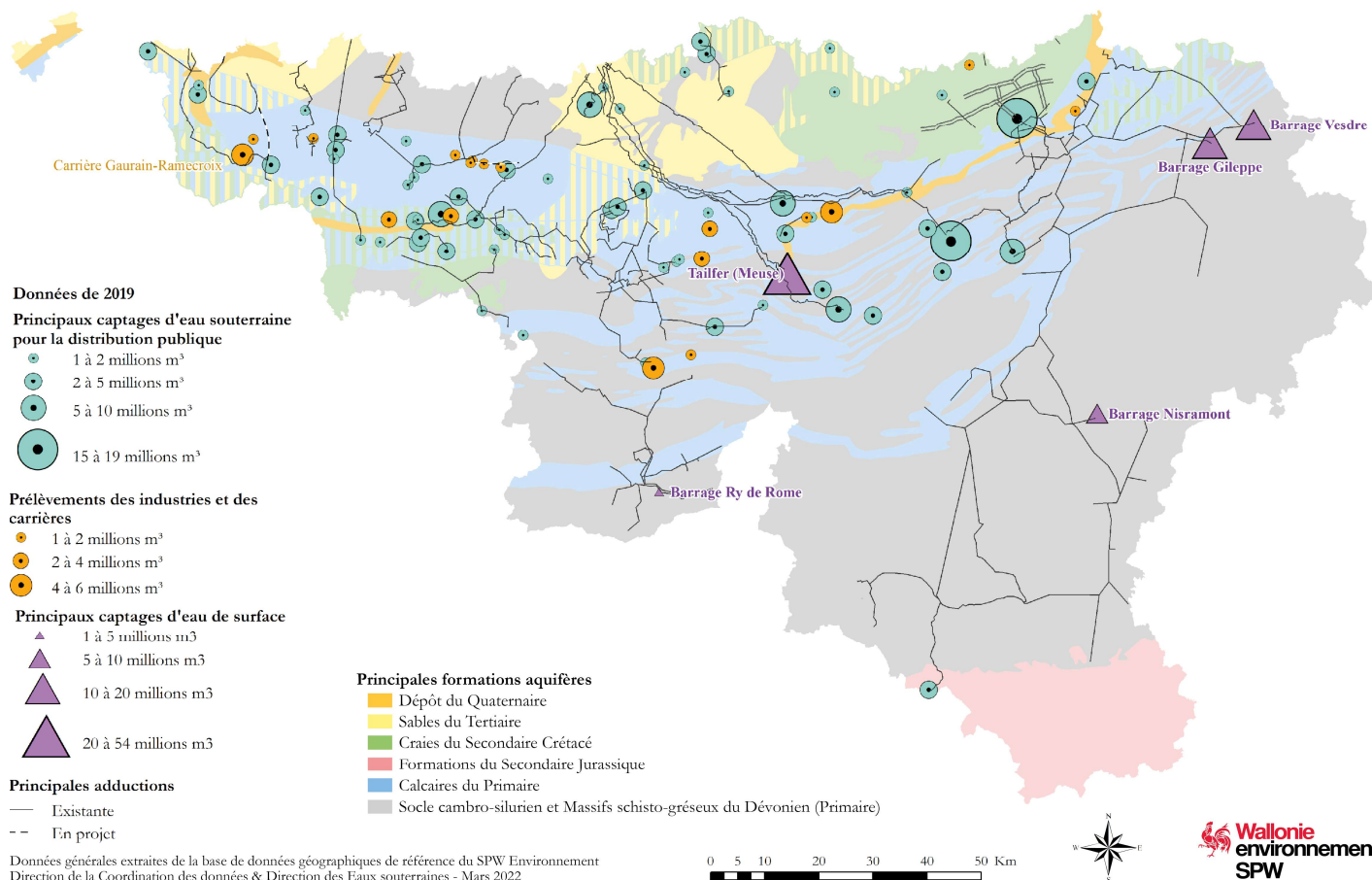
Valeurs en 2017

Nombre de compteurs du réseau de distribution	1 623 537
Nombre d'habitants	3 614 473
Consommation totale	158,42 Mm³
Consommation journalière par habitant	120 l/(hab.j)
Nombre de m³ d'eau consommés/compteur	98 m³

Source image :

<http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/MEN%203.html#>

Et si on consomme de l'eau de distribution, d'où vient-elle?

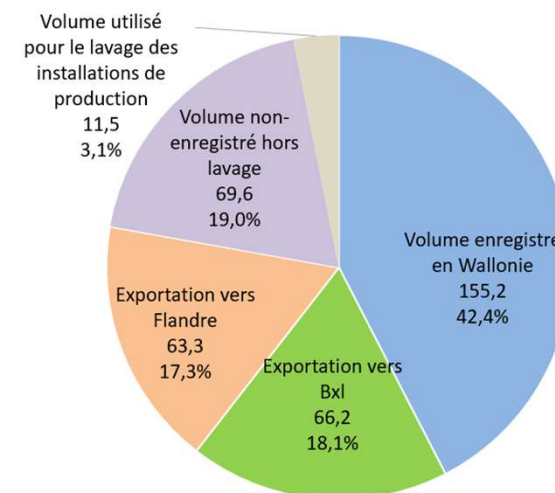


Source : Etat des nappes et des masses d'eau souterraine de Wallonie.
Mars 2022. Vingtième année. **ISNN** 2795-6091 (N)
SPW - DEE - Direction des Eaux souterraines

En 2021: volume total destiné à la distribution publique = **362,5 Mm³** dont :

- **Eau souterraine = 289,9 Mm³ (79%)**
- **Eau de surface = 75,6 Mm³ (21%)**

Rem: une part significative de cette eau est exportée vers Bruxelles et la Flandre (~38%)



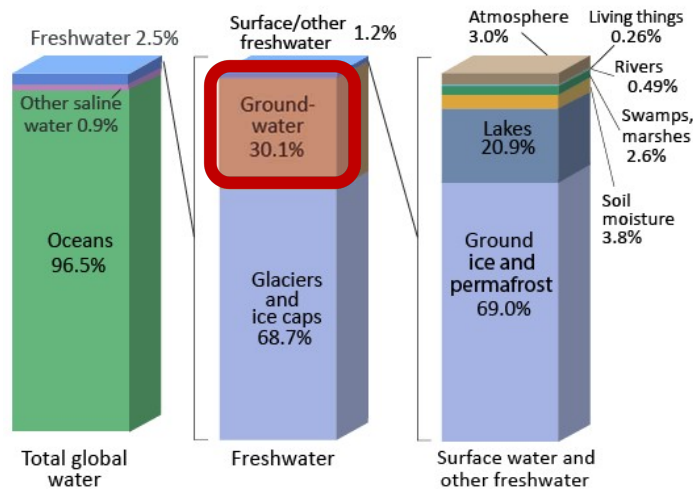
Volume total (2023) : 365,3 millions m³

Et les enjeux, quels sont-ils ?

Ressources en eau à l'échelle mondiale ...



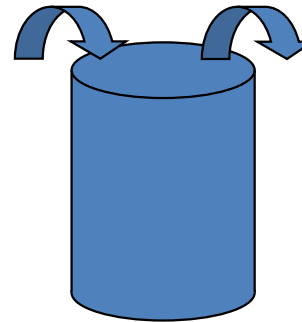
Where is Earth's Water?



Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources.
NOTE: Numbers are rounded, so percent summations may not add to 100.

<https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>

Renouvellement



Stock

Eaux de surface (lacs et rivières)

- Volumes 104.000 km³
- Renouvellement 37.000 km³

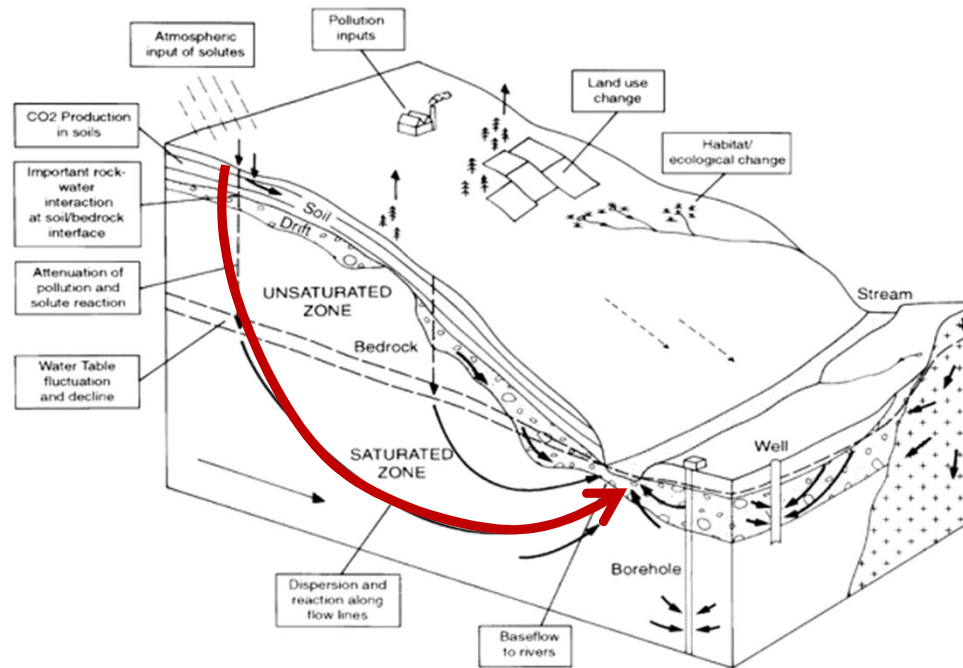
Eaux souterraines (sol inclus)

- Volumes 10.000.000 km³
- Renouvellement 3.000 km³

Conséquences :

- d'un point de vue quantité → si on prélève plus que ce qui se renouvelle, on surexploite !
- D'un point de vue qualité → si on pollue, c'est pour longtemps !

Et dans ce contexte, quel est mon profil de recherche ...



Data acquisition
Experimentation



Modelling



Decision support

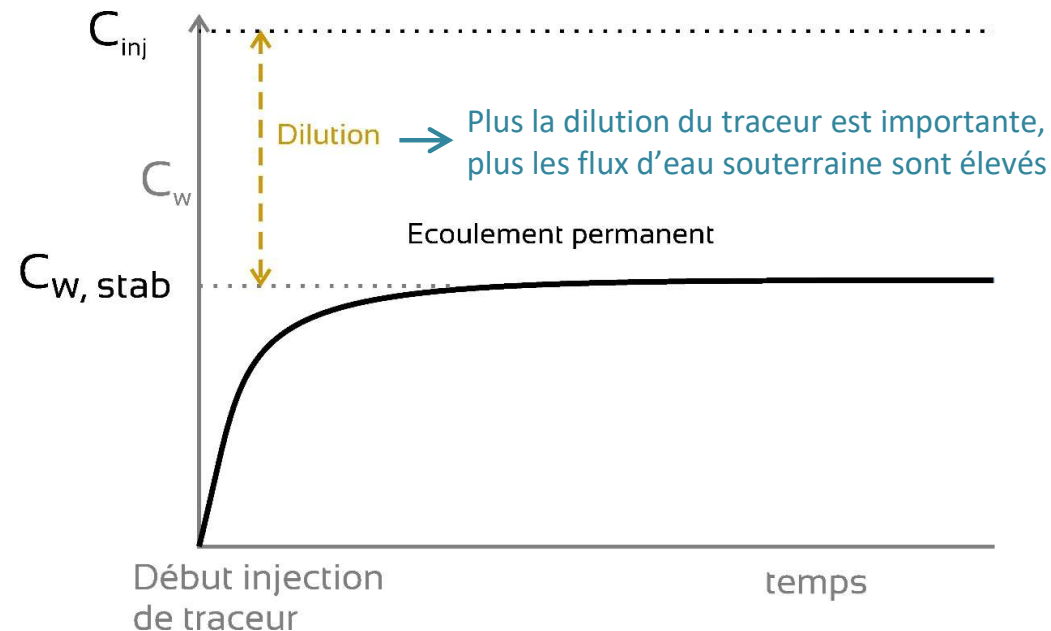
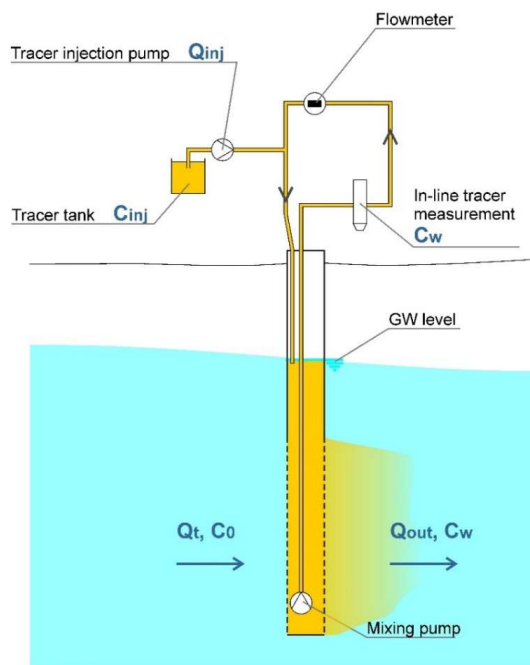
Un mot clé comme fil conducteur de mes recherches : **FLUX**



Motivation ? Quand l'eau souterraine est polluée, **c'est la mobilité des polluants qui pose problème**, plus encore que leur présence ...

Solution ? Développer un système de mesure du flux d'eau et de polluants dans l'eau souterraine

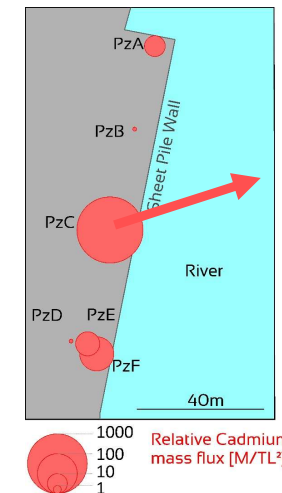
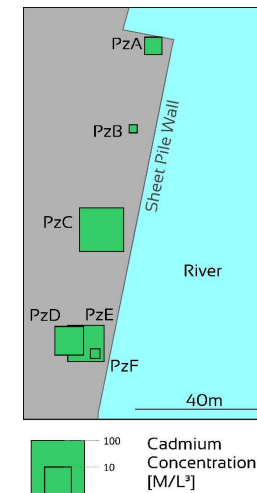
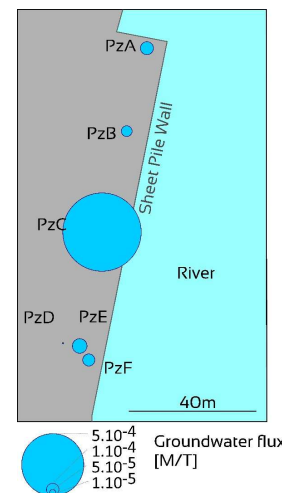
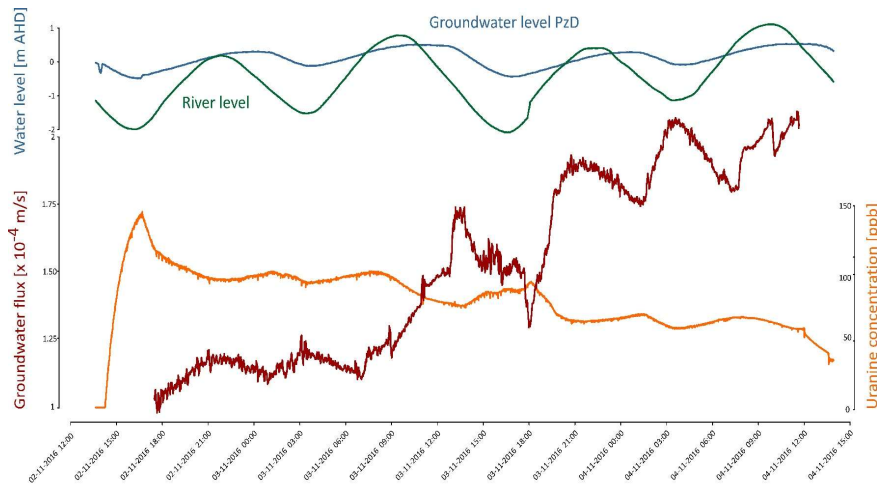
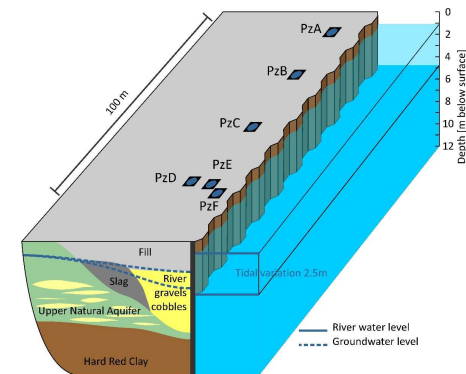
➔ Technique de traçage « puits unique » FVPDM (Brouyère et al. 2008, Jamin & Brouyère 2018, Simon et al. 2023)





Contamination d'un aquifère côtier aux métaux lourds (Australie)

Détails:
Jamin et al. (2020) GWMR



92 % of total
Cd mass flux

Data acquisition
Experimentation

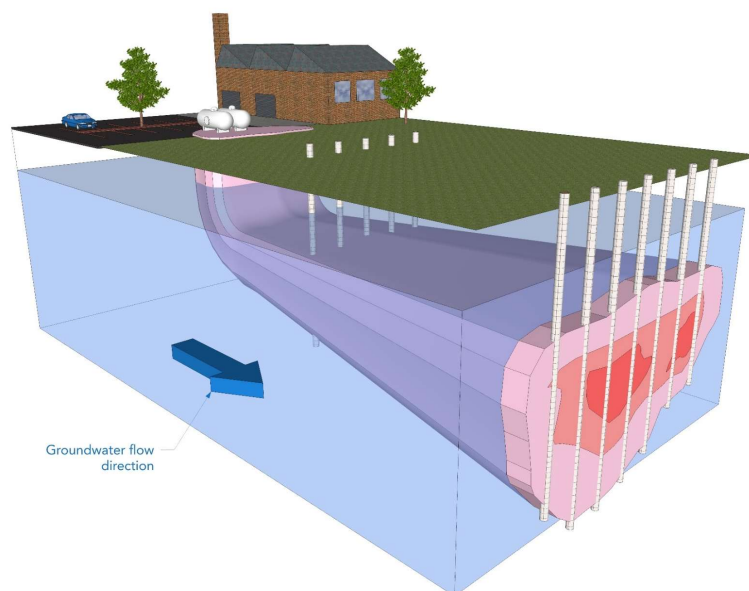
Mesures de flux d'eau et polluants dans les eaux souterraines *Des origines de la méthode FVPDM à la spinoff Nagaré*



Brevet européen
& International (Brouyère & Jamin, 2023)
+ NICOLE International
Innovation Award 2023



Spinoff NAGARÉ®



Sources images : NAGARÉ



Approche FVPDM : quantification du flux moyen d'eau en forage

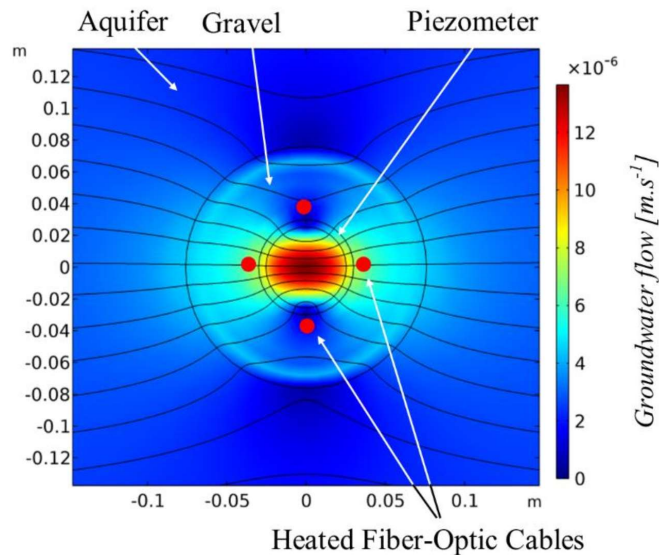
→ évoluer vers une **approche distribuée / directionnelle des mesures de flux**

En cours : Approches couplées FVPDM – Active-DTS (Distributed Temperature Sensing)

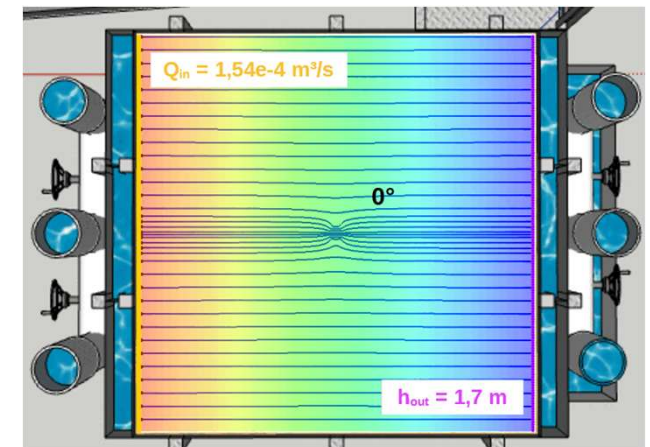
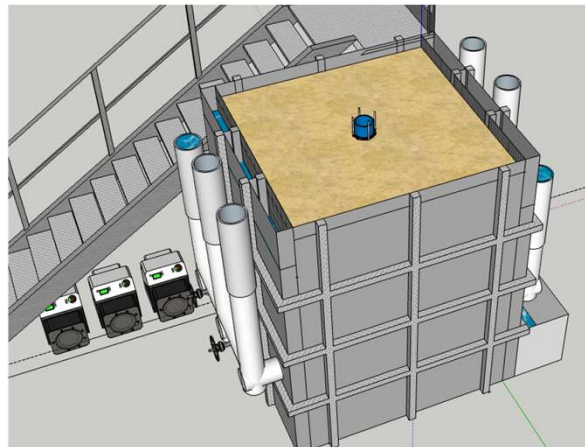
Postdoc N. Simon, PhD L. Varisano, Projet Feder REPAIRS

Du concept ...

... au projet de bac expérimental permettant de faire varier
la direction d'écoulement



Modélisation COMSOL



Modelling

Modélisation régionale des eaux souterraines *De la méthode HFEMC aux modélisations sécheresses SRRE_2.0*

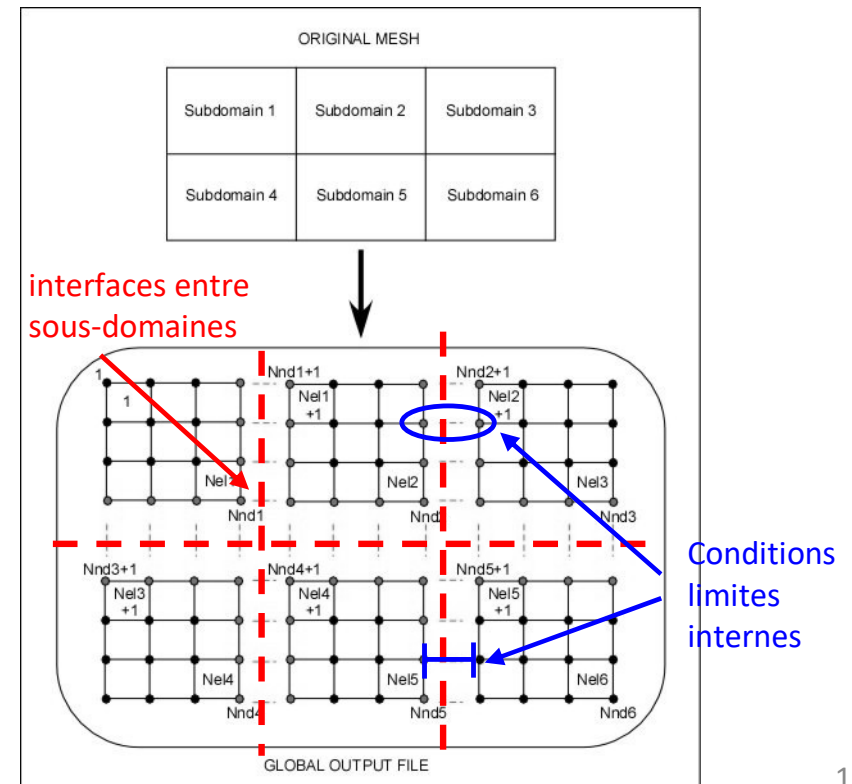


Motivations ? Modéliser numériquement les flux d'eau et de matières au sein des eaux souterraines sous l'influence de différents forçages (changement climatique, pollutions régionales ...)

Solution ? Code éléments finis SUFT3D (Saturated – Unsaturated Flow and Transport in 3D) et approche HFEMC (Hybrid Finite Element – Mixing Cell)

Au sein de chaque sous-domaine		TRANSPORT		
		Simple Linear Reservoir	Distributed Mixing Model	Advection - Dispersion
FLOW	Simple Linear Reservoir			
	Distributed Linear Reservoir			
	Flow in porous media			

Brouyère et al. 2009, Orban et al. 2010

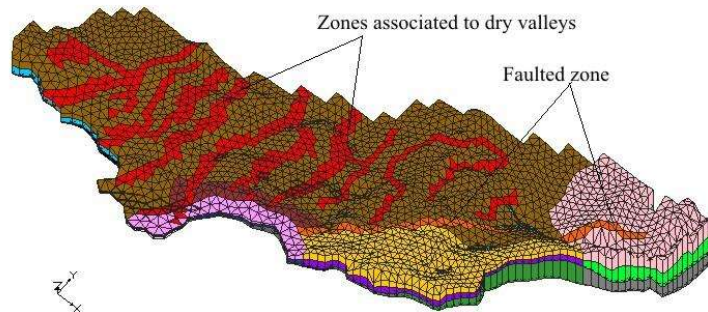
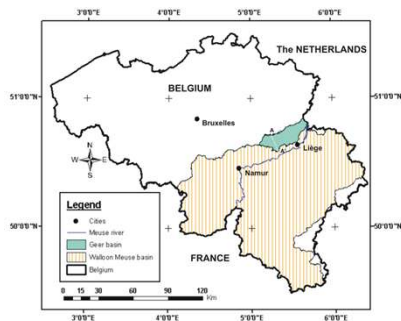


Modelling

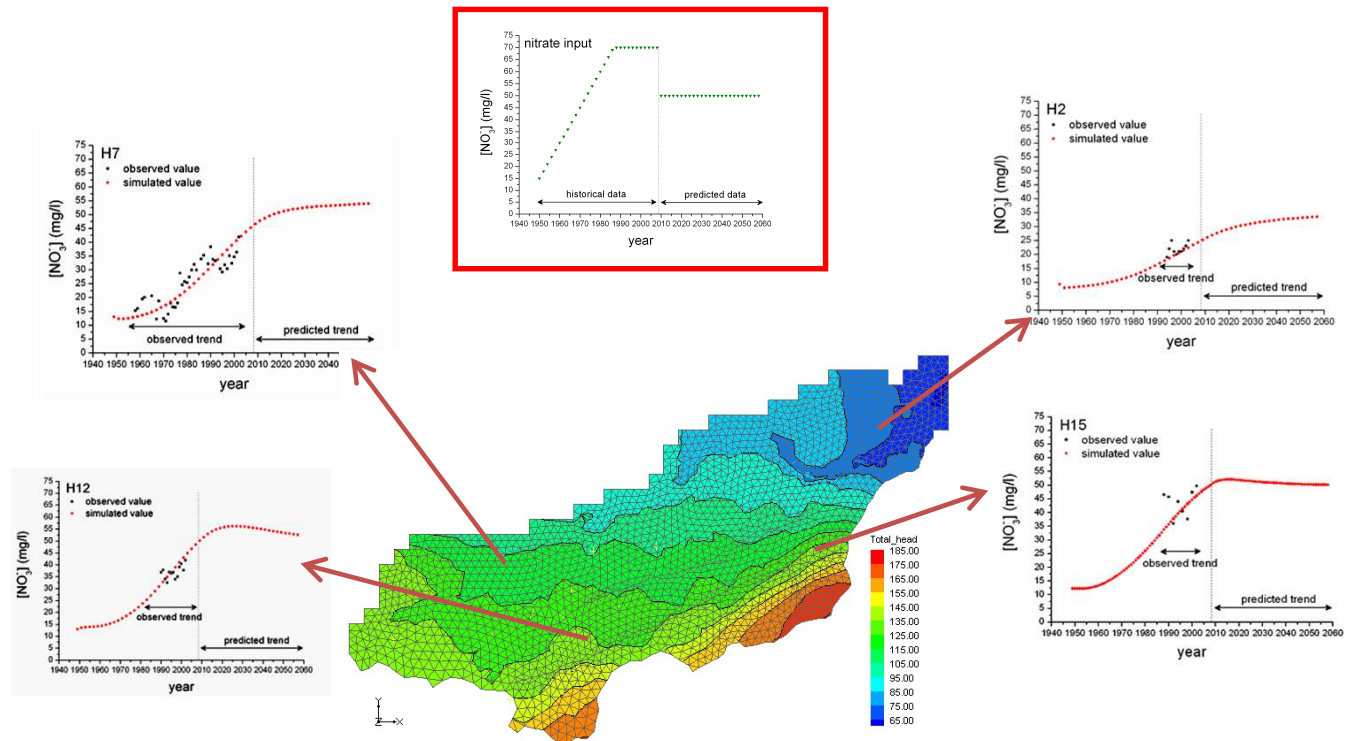
Modélisation régionale des eaux souterraines *De la méthode HFEMC aux modélisations sécheresses SRRE_2.0*



Evolution des concentrations en NO_3 dans la nappe des craies de Hesbaye
(Projet FP6 AquaTerra, PhD Ph.Orban, 2010)



- Limites du modèle : bassin du Geer
- Modèle 3D, 5 couches (2 limon, 3 craie)
- Hétérogénéité de la craie



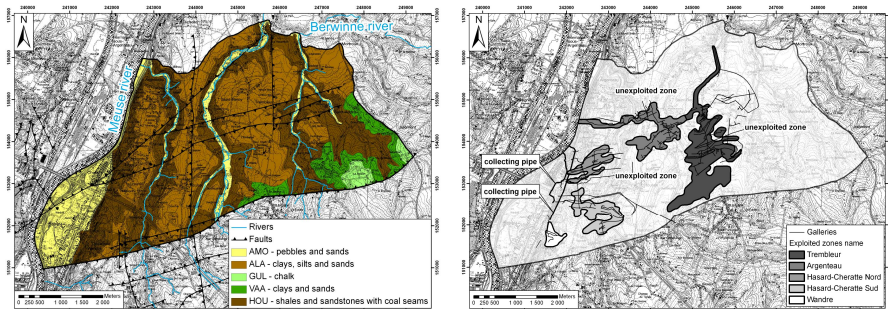
- Ecoulements calibrés en régime permanent sur base de mesures de niveaux d'eau souterraine
- Transport calibré en transitoire sur base de données tritium (âge de l'eau) + chroniques nitrate

Modelling

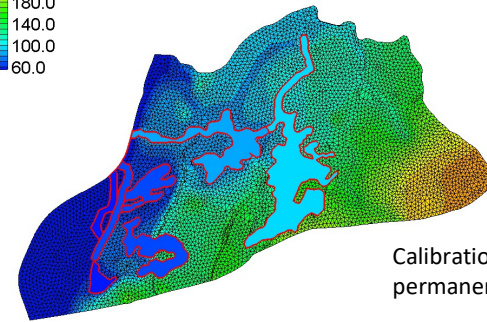
Modélisation régionale des eaux souterraines *De la méthode HFEMC aux modélisations sécheresses SRRE_2.0*



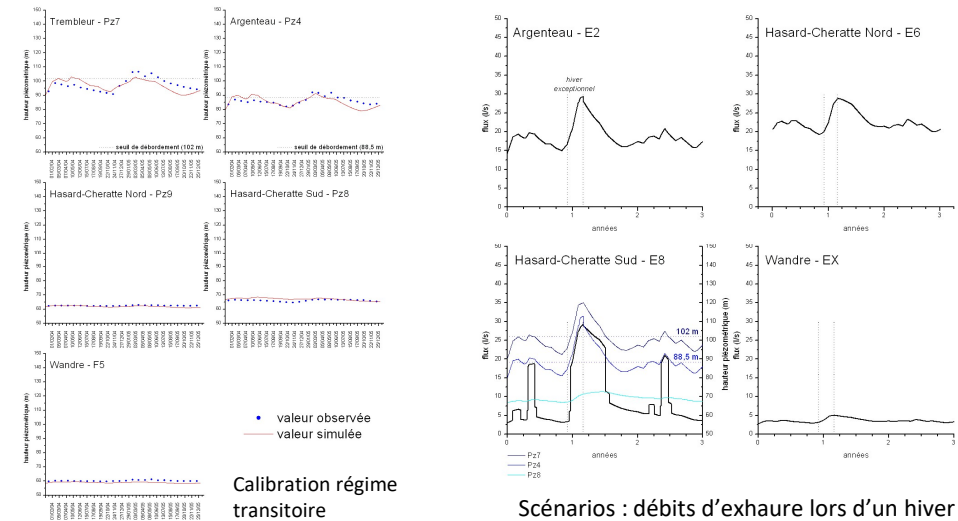
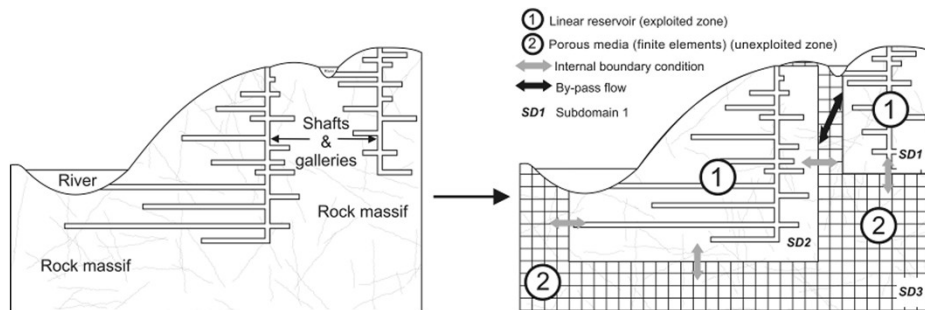
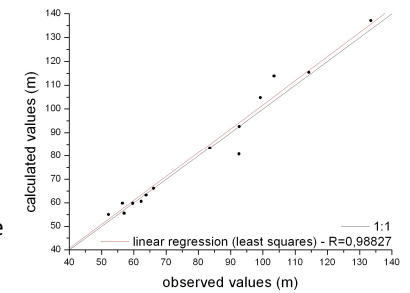
Modélisation du rebond minier dans l'ancien charbonnage de Cheratte



Total_head
220.0
180.0
140.0
100.0
60.0



Calibration régime permanent



Calibration régime transitoire

Scénarios : débits d'exhaure lors d'un hiver pluvieux

Brouyère et al. 2009, Wildemeersch et al. 2010

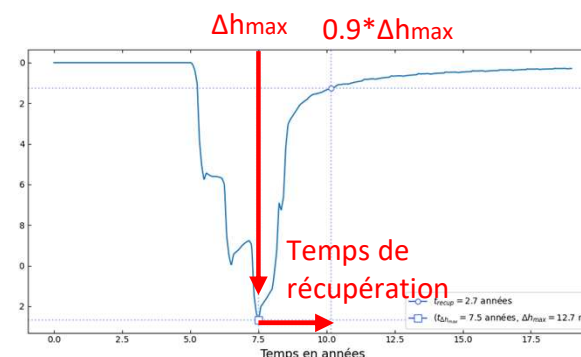
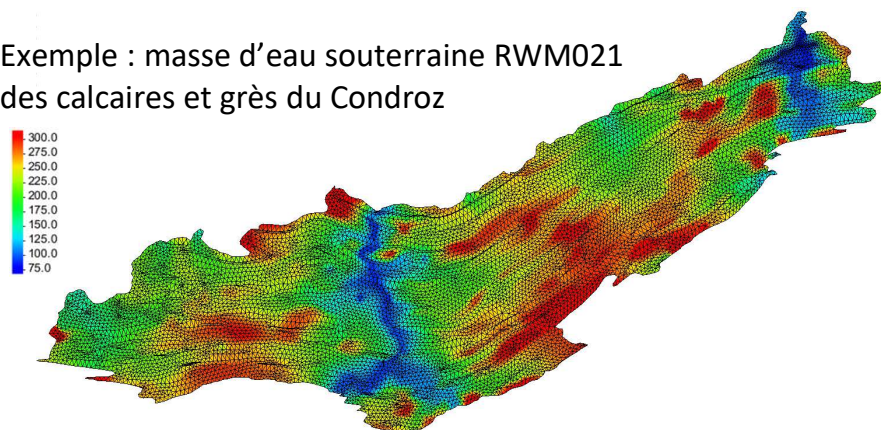
Modelling

Modélisation régionale des eaux souterraines De la méthode HFEMC aux modélisations sécheresses SRRE_2.0



Convention récurrente avec la Société Wallonne des Eaux pour développement et actualisation de modèles régionaux eau souterraine pour l'évaluation de scénarios de sécheresse / changement climatique dans le cadre du Schéma Régional Ressources en Eau 2.0 + PhD J. Hutzemakers

Exemple : masse d'eau souterraine RWM021
des calcaires et grès du Condroz

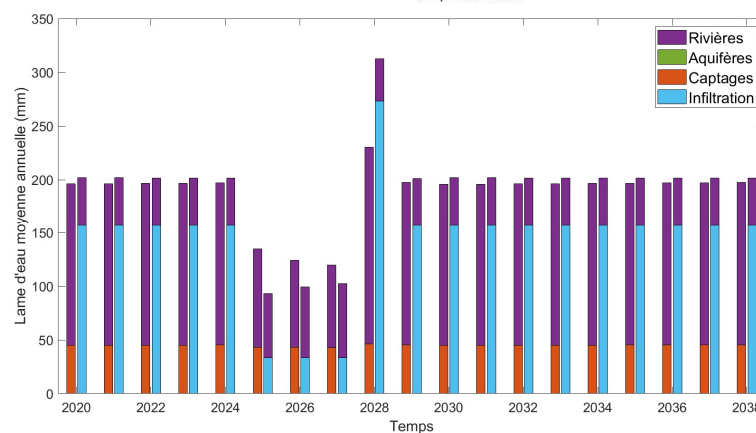
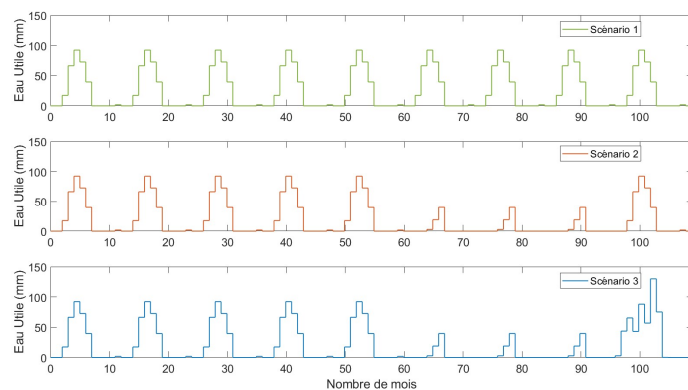


Indicateurs basés sur Δh_{max} , temps de récupération et évolution du bilan en eau

Symbole	Formule	RWM021
I_{ESO}^1	I/EU	0.54
I_{ESO}^2	Q_{ESO}/I	0
I_{ESU}^2	Q_B/I	0.68 0.23-0.94 0.52
P_1	Q_C/EU	0.15 0.7 0.09
P_2	Q_C/I	0.28 1.29 0.17

Scénario 1 Scénario 2 Scénario 3

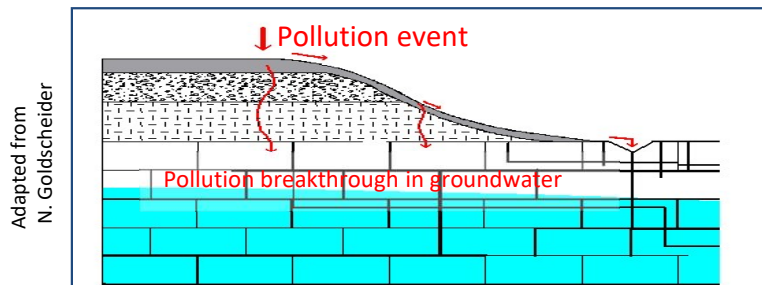
Scénarios de sécheresse hivernale



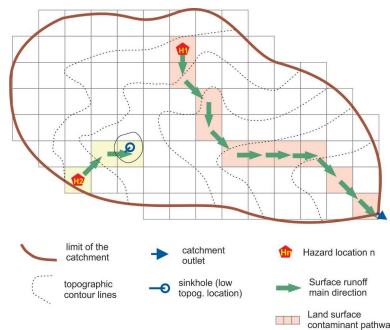
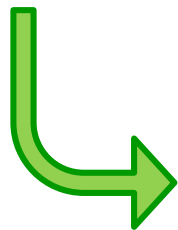


Motivations ? Besoins d'outils d'aide à la décision pour évaluer le risque de pollution de l'eau souterraine en lien avec les activités humaines

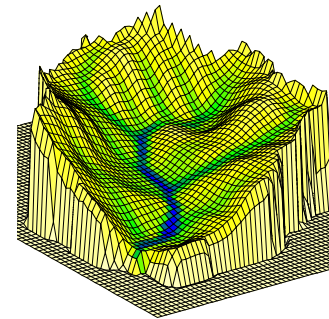
Solution ? Evaluation et cartographie du risque de pollution basée sur les flux potentiels de polluants vers et à travers les eaux souterraines, en particulier la méthode APSÛ (Brouyère et al. 2001, Popescu et al. 2004, Popescu et al. 2019)



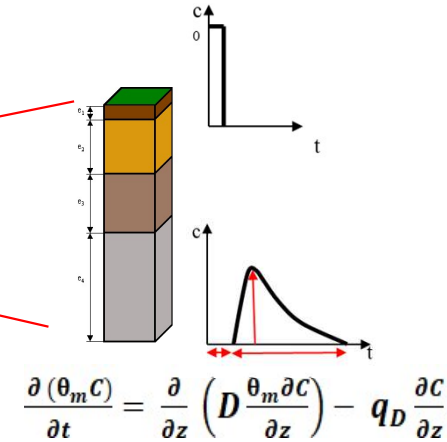
Degree of vulnerability	High	Moderate	Low
minimal travel time	Short (e.g. 24h)	Medium (e.g. 50 d)	Long (e.g. > 10y)
Concentration level / attenuation	high	medium	low
duration	long	medium	short
Relative quantity of pollutant reaching the GW table	$M_{out}/M_{in} \rightarrow 1$		$M_{out}/M_{in} \rightarrow 0$



Dangerosité de la surface du sol

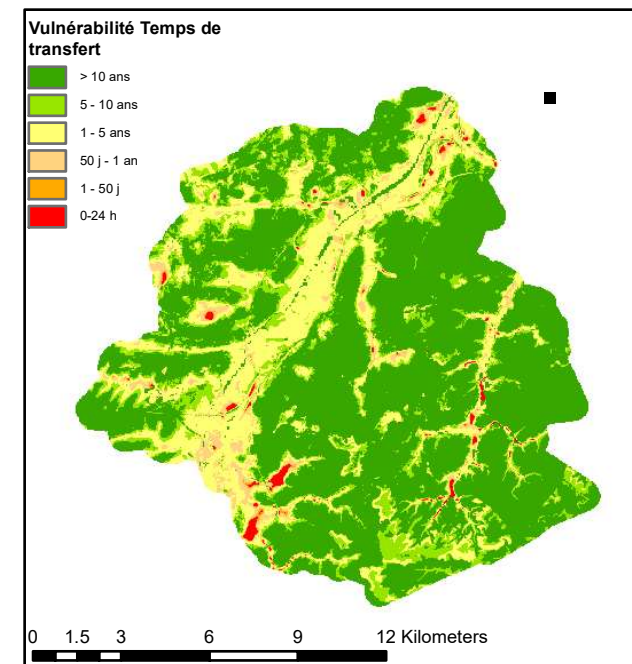
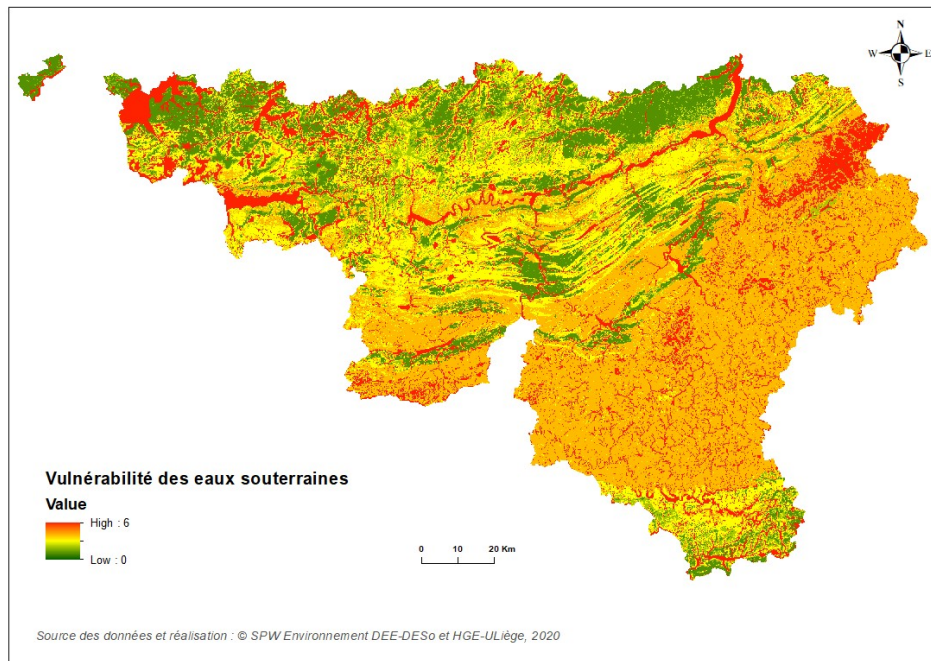


Capacité d'atténuation du milieu souterrain





Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines de Wallonie (Convention SPW APSUGIS 1 & 2) et de la Région de Bruxelles Capitale (pour Bruxelles Environnement)

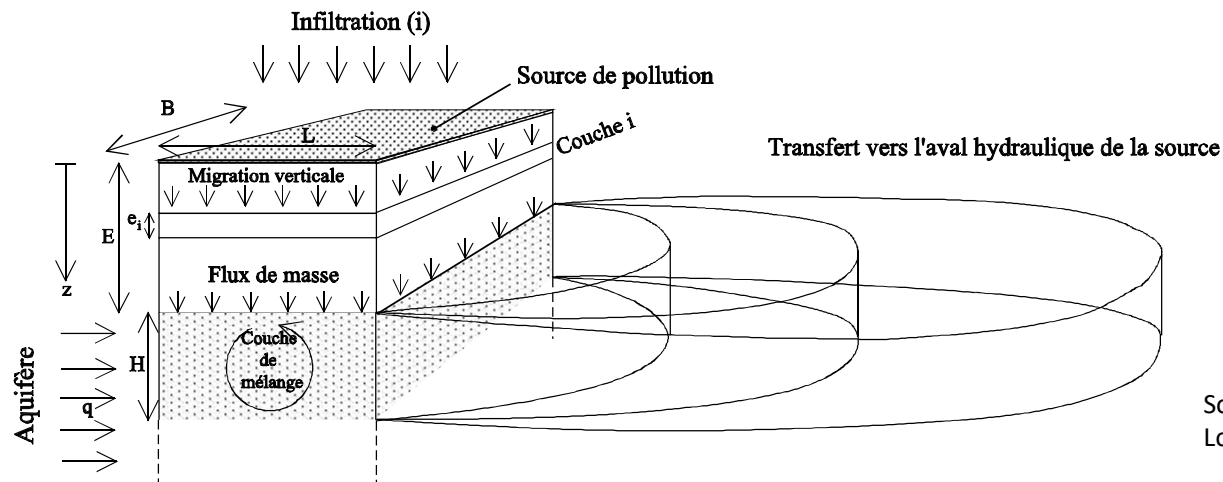


+ interfaces graphiques APSU-GIS sous ArcGIS et ApsuBru (Java)



Développement ultérieur de l'outil de calcul du lessivage utilisé dans Apsû (projets Feder REPAIRS, SPAQuE ISOLT)

- Transport réactif avec termes de **production de molécules filles** (ex: métabolites pertinents de pesticides, PFAS, solvants chlorés...)
- Couplage à un **module de dispersion dans la nappe** (« approche MISP »)
- Evaluation du **risque sur base du flux massique de polluants** dans le continuum sol - nappe

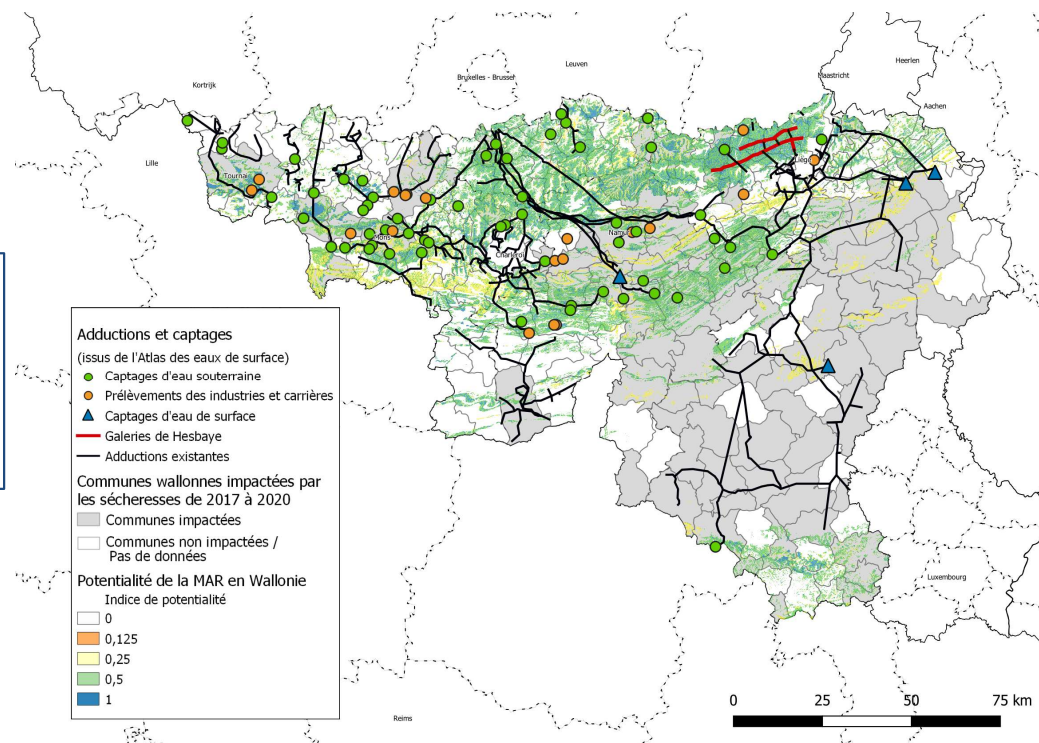
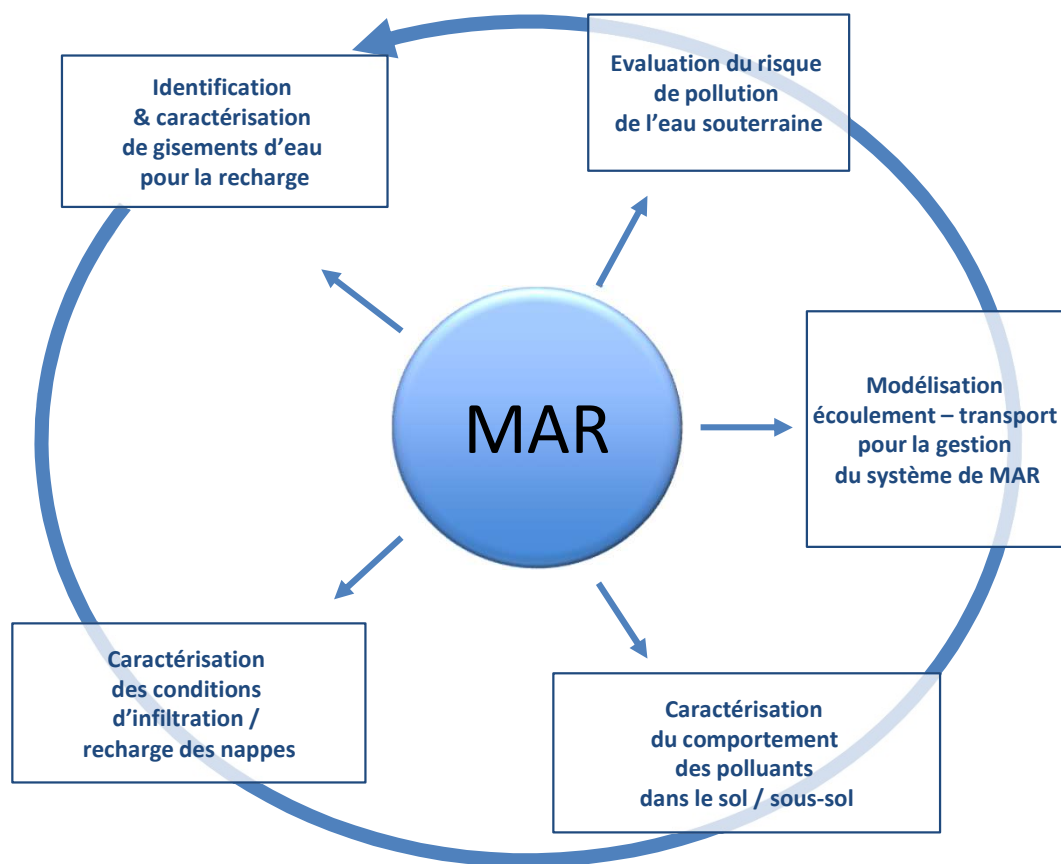


Source image:
Logiciel MISP, D. Guyonnet (BRGM)

Recharge maîtrisée des aquifères - MAR



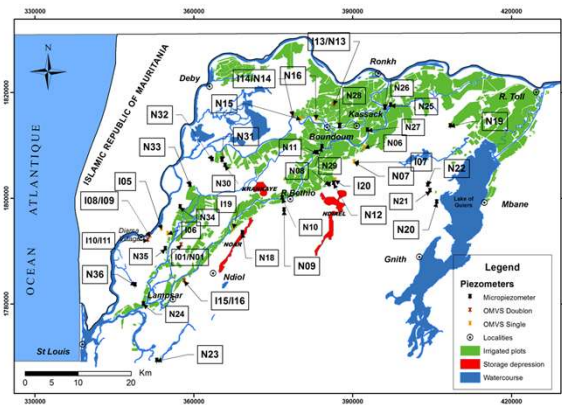
- ❖ **Projet MARWAL** - Etude de faisabilité de la **MAR** en **WALLONIE**
Financement SPW – SWDE dans le cadre du Plan de Relance de la Wallonie et Circular Wallonia



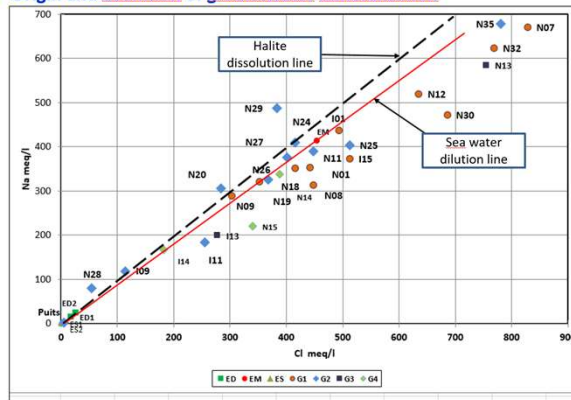
La coopération au développement



Exemple 1 : Salinisation des sols et des eaux souterraines dans le Delta du fleuve Sénégal

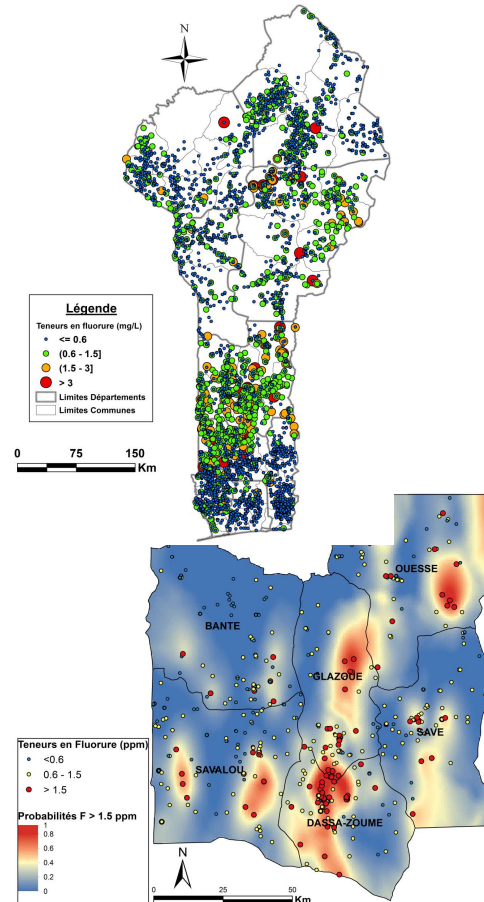


Origin and evolution of groundwater mineralization

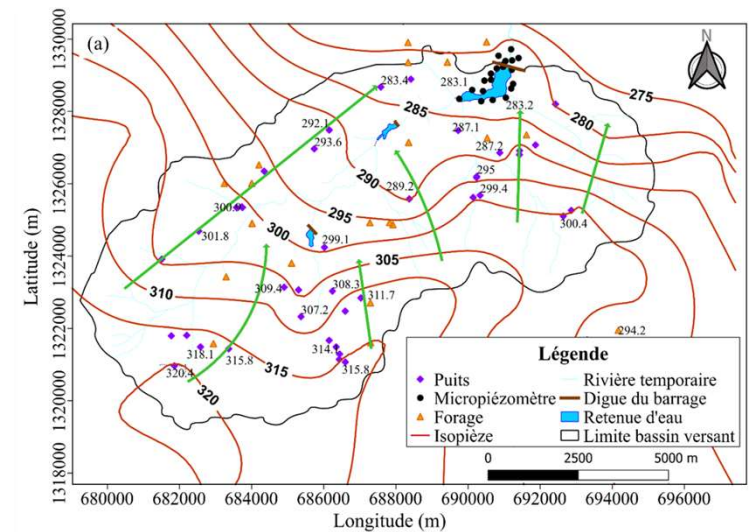


Na-Cl correlation diagram

Exemple 2 : Fluorure dans les eaux souterraines au Bénin



Exemple 3 : Eaux souterraines et irrigation au Burkina Faso



Retour à l'anecdote de départ ...



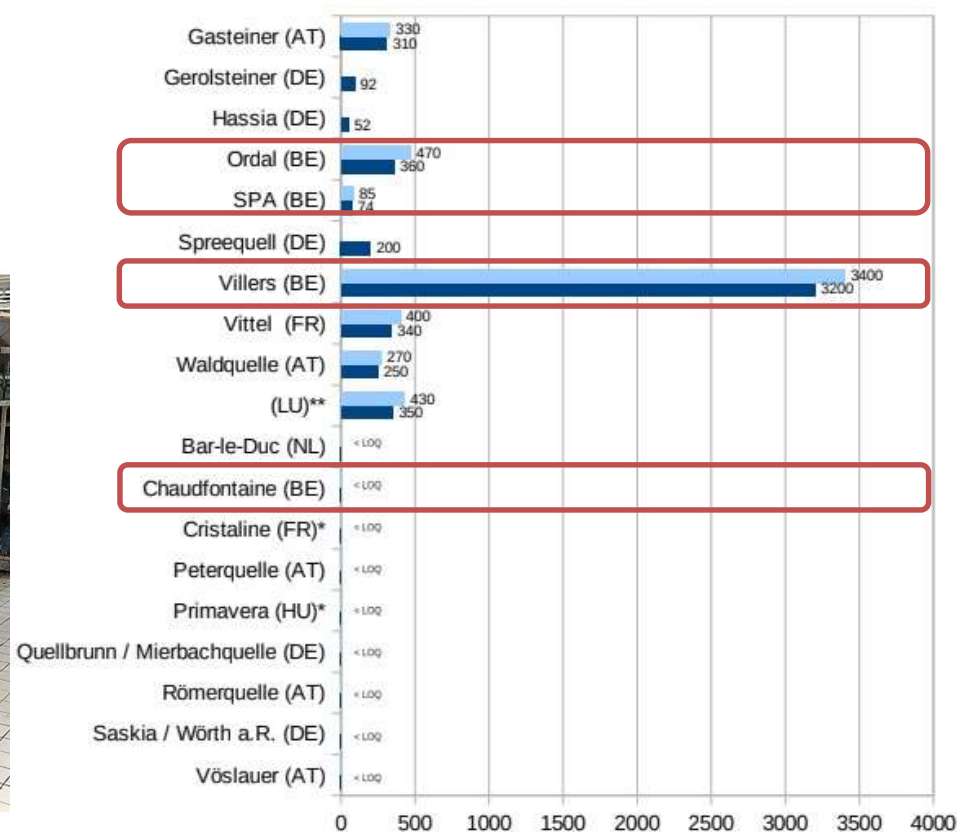
A quoi bon protéger
l'eau souterraine alors qu'on peut
acheter de l'eau en bouteille ?

Quantité : pénuries ?



Source : <https://www.francebleu.fr/infos/societe/eau-contaminee-a-rognac-et-vitrolles-ruee-sur-les-bouteilles-d-eau-minerale-jusqu-a-marseille-7371829>

Qualité : ...Résultats d'analyses du TFA (acide trifluoroacétique)
sur 19 eaux minérales naturelles en Europe ...



Source : <https://www.pan-europe.info/resources/briefings/2024/12/tfa-%E2%80%98forever-chemical%E2%80%99-european-mineral-waters>